Commission géologique du Canada

RECHERCHES EN COURS
2003-D3

Vulnérabilité à la nappe des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec : évaluation par les méthodes DRASTIC et GOD

V. Murat, D. Paradis, M.M. Savard, M. Nastev, É. Bourque, A. Hamel, R. Lefebvre et R. Martel

2003

RECHERCHES EN COURS

Ressources naturelles Canada | Natural Resources Canada

Canada

©Sa Majesté la Reine du chef du Canada 2003
ISSN 1701-4387

En ligne sur le site Web de la Librairie de la
Commission géologique du Canada, à l'adresse
http://www.rncan.gc.ca/cgc/bookstore (sans frais : 1-888-252-4301)

Les bibliothèques de dépôt d'un bout à l'autre du pays ont accès à la présente publication par l'intermédiaire du site Web du Programme des services de dépôt (http://dsp-psd.tpsgc.gc.ca).

Les demandes de permission pour reproduire cet article, en tout ou en partie, à des fins d'utilisation commerciale, de revente ou de redistribution doivent être adressées à la Division de l'information du Secteur des sciences de la Terre, pièce 402, 601, rue Booth, Ottawa (Ontario) K1A 0E8.

Adresse des auteurs

***V. Murat** (vmurat@nrcan.gc.ca)*
***D. Paradis** (suparadi@nrcan.gc.ca)*
***M.M. Savard** (msavard@nrcan.gc.ca)*
***M. Nastev** (mnastev@nrcan.gc.ca)*
É. Bourque
Commission géologique du Canada
880, chemin Sainte-Foy, bureau 840
Québec (Québec)
G1S 2L2

***A. Hamel** (andhamel@ggl.ulaval.ca)*
Université Laval
Département de géologie et de génie géologique
Pavillon Adrien-Pouliot, bureau 4309
Québec (Québec)
G1K 7P4

***R. Lefebvre** (ess-inrs-rlefebvre@x1.nrcan.gc.ca)*
***R. Martel** (ess-inrs-rmartel@x1.nrcan.gc.ca)*
INRS-Eau, Terre et Environnement
Université du Québec
880, chemin Sainte-Foy
C.P. 7500
Sainte-Foy (Québec)
G1V 4C7

Publication approuvée par la CGC-Québec

106-03631/

Vulnérabilité à la nappe des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec : évaluation par les méthodes DRASTIC et GOD

V. Murat, D. Paradis, M.M. Savard, M. Nastev, É. Bourque, A. Hamel, R. Lefebvre et R. Martel

Murat, V., Paradis, D., Savard, M.M., Nastev, M., Bourque, É., Hamel, A., Lefebvre, R. et Martel, R., 2003 : Vulnérabilité à la nappe des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec : évaluation par les méthodes DRASTIC et GOD; Commission géologique du Canada, Recherches en cours 2003-D3, 14 p.

Résumé : Cette étude fait état de l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères régionaux dans le cadre du projet de caractérisation du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec de la Commission géologique du Canada. L'étude de la vulnérabilité consiste à évaluer la sensibilité de la ressource à toute forme de polluant introduit à partir de la surface du sol en se basant sur les propriétés physiques du milieu. Deux méthodes, DRASTIC et GOD, ont été appliquées afin d'être comparées. Les résultats obtenus montrent une évaluation plus fine avec la méthode DRASTIC. Celle-ci montre que les zones à plus forte vulnérabilité apparaissent au niveau des zones de recharge, soit dans les parties nord, nord-ouest et sud-est de la région étudiée, alors que les zones à plus faible vulnérabilité sont situées dans les secteurs où l'épaisseur d'argile est importante. Avec la méthode GOD, la région à l'étude apparaît dans l'ensemble à vulnérabilité modérée, ce qui n'est pas représentatif du territoire.

Abstract: This study presents an assessment of the vulnerability of regional aquifers as part of the Geological Survey of Canada project of characterization of fractured-rock aquifers in southwestern Quebec. Vulnerability assessment uses the physical properties of the setting to evaluate the sensitivity of groundwater to all types of pollutants introduced from the ground surface. Two methods, DRASTIC and GOD, were used for comparison purposes. Results indicate that the DRASTIC method yields a more detailed assessment. This method shows the higher vulnerability areas as coinciding with recharge zones in the northern, northwestern and southeastern parts of the study area, with the lower vulnerability areas located where clay cover is significant. When the GOD method is used, the entire study area appears to have moderate vulnerability, which is not an adequate representation of the region.

INTRODUCTION

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un projet pilote de la Commission géologique du Canada sur la caractérisation régionale du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec qui couvre une superficie de 1500 km^2 (Savard et al., 2000). L'aquifère à l'étude s'étend à une partie du territoire des municipalités régionales de comté d'Argenteuil, de Mirabel, de Deux-Montagnes et de Thérèse-de-Blainville. La présente étude a pour but d'évaluer la vulnérabilité régionale à la pollution du système aquifère, afin d'assurer un aménagement et une gestion du territoire qui permettent la préservation d'une ressource de qualité. Ainsi, l'évaluation de la vulnérabilité souterraine vise à fournir un outil d'aide à la décision. Le fait que l'estimation de la vulnérabilité soit relative au territoire à l'étude et que les valeurs attribuées sont des valeurs ordinales non absolues implique que les résultats ne sont utilisables que dans un contexte régional. Un autre objectif de l'étude était de comparer les méthodes DRASTIC et GOD afin de choisir la plus appropriée.

CONTEXTE D'ÉVALUATION

Le territoire étudié se situe dans la vallée du Saint-Laurent. Le terrain est caractérisé par un relief généralement plat à ondulé, les collines d'Oka, au sud, et de Saint-André, au sud-ouest, étant les seuls éléments présentant un relief important (fig. 1). Les roches du secteur à l'étude sont principalement d'origine sédimentaire, d'âge paléozoïque et occupent les basses terres du Saint-Laurent. Ces roches reposent en discordance sur les roches ignées et métamorphiques du Précambrien de la Province de Grenville et sont recoupées par les intrusions crétacées d'Oka et de Saint-André (Bourque et al., 2001). On retrouve, de plus, une grande variété de dépôts quaternaires allant des sédiments marins aux sédiments glaciaires (fig. 2). L'épaisseur des tills est en moyenne de 10 m. Dans les régions plus hautes, l'épaisseur de till diminue et le roc affleure parfois. La recharge de l'aquifère se fait principalement dans ces zones. Ces dépôts sont recouverts par des argiles marines dont l'épaisseur moyenne est d'environ 15 m (Fagnan et al., 2001) et occasionnellement par du sable. Le long des principales vallées de la région, les argiles forment les plus importantes accumulations de dépôts quaternaires.

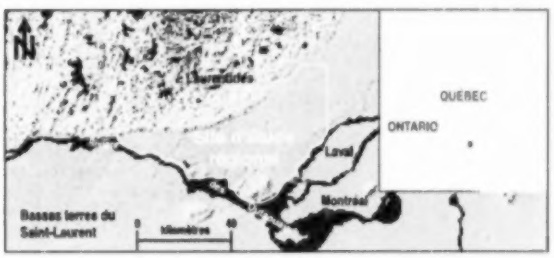

Figure 1. *Carte de localisation du site d'étude et physiographie régionale.*

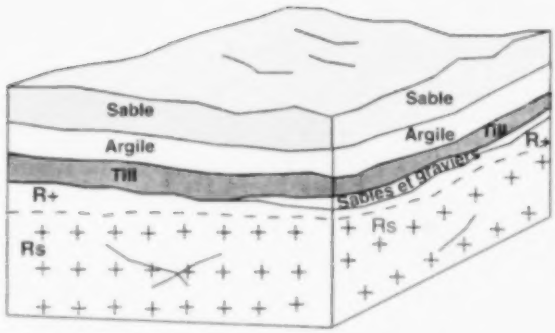

Figure 2. *Modèle conceptuel représentant les principales unités hydrogéologiques. Modifié de Nastev et al. (2001) et Fagnan (1998). R+ = calcaire, Rs = roches métamorphiques et plutoniques*

Les zones présentant les plus fortes épaisseurs de dépôts quaternaires sont situées autour des collines d'Oka, ainsi que dans les régions de Saint-Hermas, de Lachute et de Sainte-Anne-des-Plaines (fig. 4 dans Fagnan et al., 2001). Ces zones, où les dépôts sont constitués en majorité d'argile, offrent une protection naturelle aux aquifères rocheux. Les régions où l'épaisseur de sédiments est plus faible (moins de 5 m) ou les secteurs où les dépôts quaternaires sont surtout formés de sable (au sud de la rivière du Nord et dans la région de Saint-Eustache) constituent des zones plus vulnérables à l'infiltration de polluants. C'est dans ce contexte qu'une étude de vulnérabilité s'avère intéressante pour savoir dans quelle mesure les zones à plus forte vulnérabilité constituent un danger pour la ressource en eau souterraine.

MÉTHODOLOGIE

Les méthodes DRASTIC et GOD

Il n'existe pas de méthode absolue d'évaluation de la vulnérabilité des nappes d'eau souterraine, mais plusieurs méthodes d'estimation de la sensibilité des aquifères à la pollution ont été mises au point (Murat, 2000; Murat et al., 2000b). Dans le cadre de la présente étude, deux d'entre elles sont appliquées, soit les méthodes DRASTIC (Aller et al., 1987) et GOD (Foster et Hirata, 1991).

La méthode DRASTIC est empirique et repose sur les hypothèses suivantes : le territoire d'application couvre plus de 0,4 km^2, le contaminant se propage dans le milieu à partir de la surface du sol par infiltration des précipitations et le type de contaminant n'intervient pas sur le degré de vulnérabilité. La méthode est basée sur l'évaluation de sept paramètres : profondeur à la nappe (D), recharge (R), type d'aquifère (A), type de sol (S), topographie (T), impact de la zone vadose (I) et conductivité hydraulique (C). Pour chaque paramètre, la plage de valeurs possibles est subdivisée en différents intervalles et une cote est attribuée à chacun d'eux. Un indice de vulnérabilité ($I_{DRASTIC}$) est alors calculé en additionnant

INTRODUCTION

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un projet pilote de la Commission géologique du Canada sur la caractérisation régionale du système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec qui couvre une superficie de 1500 km^2 (Savard et al., 2000). L'aquifère à l'étude s'étend à une partie du territoire des municipalités régionales de comté d'Argenteuil, de Mirabel, de Deux-Montagnes et de Thérèse-de-Blainville. La présente étude a pour but d'évaluer la vulnérabilité régionale à la pollution du système aquifère, afin d'assurer un aménagement et une gestion du territoire qui permettent la préservation d'une ressource de qualité. Ainsi, l'évaluation de la vulnérabilité souterraine vise à fournir un outil d'aide à la décision. Le fait que l'estimation de la vulnérabilité soit relative au territoire à l'étude et que les valeurs attribuées sont des valeurs ordinales non absolues implique que les résultats ne sont utilisables que dans un contexte régional. Un autre objectif de l'étude était de comparer les méthodes DRASTIC et GOD afin de choisir la plus appropriée.

CONTEXTE D'ÉVALUATION

Le territoire étudié se situe dans la vallée du Saint-Laurent. Le terrain est caractérisé par un relief généralement plat à ondulé, les collines d'Oka, au sud, et de Saint-André, au sud-ouest, étant les seuls éléments présentant un relief important (fig. 1). Les roches du secteur à l'étude sont principalement d'origine sédimentaire, d'âge paléozoïque et occupent les basses terres du Saint-Laurent. Ces roches reposent en discordance sur les roches ignées et métamorphiques du Précambrien de la Province de Grenville et sont recoupées par les intrusions crétacées d'Oka et de Saint-André (Bourque et al., 2001). On retrouve, de plus, une grande variété de dépôts quaternaires allant des sédiments marins aux sédiments glaciaires (fig. 2). L'épaisseur des tills est en moyenne de 10 m. Dans les régions plus hautes, l'épaisseur de till diminue et le roc affleure parfois. La recharge de l'aquifère se fait principalement dans ces zones. Ces dépôts sont recouverts par des argiles marines dont l'épaisseur moyenne est d'environ 15 m (Fagnan et al., 2001) et occasionnellement par du sable. Le long des principales vallées de la région, les argiles forment les plus importantes accumulations de dépôts quaternaires.

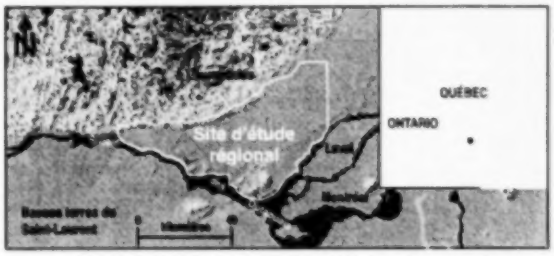

Figure 1. *Carte de localisation du site d'étude et physiographie régionale.*

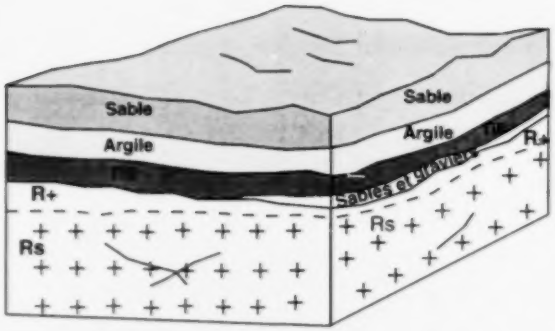

Figure 2. *Modèle conceptuel représentant les principales unités hydrogéologiques. Modifié de Nastev et al. (2001) et Fagnan (1998). R+ = calcaire, Rs = roches métamorphiques et plutoniques*

Les zones présentant les plus fortes épaisseurs de dépôts quaternaires sont situées autour des collines d'Oka, ainsi que dans les régions de Saint-Hermas, de Lachute et de Sainte-Anne-des-Plaines (fig. 4 dans Fagnan et al., 2001). Ces zones, où les dépôts sont constitués en majorité d'argile, offrent une protection naturelle aux aquifères rocheux. Les régions où l'épaisseur de sédiments est plus faible (moins de 5 m) ou les secteurs où les dépôts quaternaires sont surtout formés de sable (au sud de la rivière du Nord et dans la région de Saint-Eustache) constituent des zones plus vulnérables à l'infiltration de polluants. C'est dans ce contexte qu'une étude de vulnérabilité s'avère intéressante pour savoir dans quelle mesure les zones à plus forte vulnérabilité constituent un danger pour la ressource en eau souterraine.

MÉTHODOLOGIE

Les méthodes DRASTIC et GOD

Il n'existe pas de méthode absolue d'évaluation de la vulnérabilité des nappes d'eau souterraine, mais plusieurs méthodes d'estimation de la sensibilité des aquifères à la pollution ont été mises au point (Murat, 2000; Murat et al., 2000b). Dans le cadre de la présente étude, deux d'entre elles sont appliquées, soit les méthodes DRASTIC (Aller et al., 1987) et GOD (Foster et Hirata, 1991).

La méthode DRASTIC est empirique et repose sur les hypothèses suivantes : le territoire d'application couvre plus de 0,4 km^2, le contaminant se propage dans le milieu à partir de la surface du sol par infiltration des précipitations et le type de contaminant n'intervient pas sur le degré de vulnérabilité. La méthode est basée sur l'évaluation de sept paramètres : profondeur à la nappe (D), recharge (R), type d'aquifère (A), type de sol (S), topographie (T), impact de la zone vadose (I) et conductivité hydraulique (C). Pour chaque paramètre, la plage de valeurs possibles est subdivisée en différents intervalles et une cote est attribuée à chacun d'eux. Un indice de vulnérabilité ($I_{DRASTIC}$) est alors calculé en additionnant

la contribution des sept paramètres, pondérée selon l'importance de chacun de ces paramètres dans l'évaluation de la vulnérabilité, à l'aide de l'équation :

$$I_{DRASTIC} = D_w D_r + R_w R_r + A_w A_r + S_w S_r + T_w T_r +$$

$$I_w I_r + C_w C_r$$

où w et r désignent respectivement le poids et la valeur de l'intervalle (cote) attribués à chaque paramètre. Aux fins d'interprétation, les valeurs possibles de l'indice DRASTIC sont subdivisées en huit intervalles ou classes (tableau 1).

La vulnérabilité des aquifères confinés, ou captifs, et celle des aquifères non confinés, ou libres, doivent être évaluées sur deux cartes différentes. Dans le cas où plusieurs aquifères se superposent, on choisit celui que l'on désire évaluer. Il est important d'identifier les unités hydrogéologiques et les limites de l'aquifère à évaluer.

La méthode GOD utilise aussi une approche empirique où la vulnérabilité des aquifères est définie en fonction de l'inaccessibilité de la zone saturée, au sens de pénétration du polluant, et de la capacité d'atténuation que présente la couche sus-jacente à la zone saturée. L'approche employée pour ce modèle a recours à trois paramètres. Le premier réside dans l'identification du type d'aquifère en fonction de son degré de confinement (Ci), le deuxième correspond à la profondeur à la nappe (Cp) et le troisième est défini par les caractéristiques des couches surmontant la zone saturée de l'aquifère en ce qui a trait à leur degré de porosité relative, à leur perméabilité et à leur contenu en eau (Ca). L'indice de vulnérabilité (I_{GOD}) (tableau 2) est obtenu par la multiplication des indices de chacun de ces trois paramètres :

Tableau 1. Intervalles des valeurs de l'indice DRASTIC et classes correspondantes.

Intervalle	Classe DRASTIC
23–79	8
80–99	7
100–119	6
120–139	5
140–159	4
160–179	3
180–199	2
200–226	1

Tableau 2. Intervalles des valeurs de l'indice GOD et classes correspondantes.

Intervalle	Classe GOD
0	aucune vulnérabilité
0 à 0,1	vulnérabilité très faible
0,1 à 0,3	vulnérabilité faible
0,3 à 0,5	vulnérabilité modérée
0,5 à 0,7	vulnérabilité forte
0,7 à 1	vulnérabilité extrême

$$I_{GOD} = Ci*Cp*Ca$$

L'évaluation de la vulnérabilité par les méthodes GOD et DRASTIC implique la collecte, la validation et l'analyse des données, l'évaluation des paramètres (cartes paramétriques) et l'application du modèle. Les cartes paramétriques sont élaborées en format matriciel, lequel se prête mieux à l'étape finale de superposition des couches.

Découpage territorial pour l'évaluation de la vulnérabilité

L'évaluation de la vulnérabilité est estimée pour le système aquifère rocheux. Les secteurs où l'aquifère est fortement confiné par l'argile n'ont pas été évalués. Afin de limiter l'évaluation de la vulnérabilité aux parties non confinées de l'aquifère, un premier découpage de la région est effectué. Pour ce découpage, une couverture de 3 m d'argile a été jugée suffisante pour permettre une protection efficace de l'aquifère. Or, d'après des études réalisées sur les dépôts argileux de la Mer de Champlain, les argiles de ce type non recouvertes par d'autres sédiments présentent généralement des altérations sur une épaisseur pouvant aller jusqu'à 3 m, ce qui rend inefficace la protection qu'elles devraient procurer (Desaulniers et Cherry, 1989). En conséquence, le découpage utilise une épaisseur limite d'argile de 3 m, sauf dans les secteurs où les dépôts d'argile sont dépourvus d'une couverture de sédiments (ce qui pourrait avoir causé leur altération) où l'épaisseur limite a été placée à 6 m.

Évaluation des paramètres et calcul des cotes de vulnérabilité.

La qualité des cartes de vulnérabilité dépend, entre autres, des données et du traitement auquel elles ont été soumises. Ainsi, un examen minutieux des données doit être effectué afin de mettre en évidence l'information disponible et sa qualité. Dans le cas de la présente étude, l'intégration des résultats des travaux sur le terrain effectués pendant les étés 1999 et 2000 a complété la connaissance du territoire qu'avait permise la compilation des données existantes. Les jeux de données disponibles sont de types ponctuel, vectoriel et matriciel. Aux fins d'application des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité, le but du traitement des données est la transformation des données de types ponctuel et vectoriel en données matricielles ainsi que l'uniformisation du format des données matricielles.

À la figure 3 sont décrits les symboles utilisés dans les organigrammes servant à décrire les différentes étapes de l'élaboration des cartes paramétriques. Pour chaque paramètre, une figure montre les étapes qui permettent d'obtenir une carte matricielle (fig. 4 à 13). Les paragraphes suivants décrivent ce qu'il faut retenir de l'évaluation paramétrique.

L'évaluation du paramètre «profondeur à la nappe» (fig. 4) a été réalisée par l'interpolation des données sur les niveaux d'eau. Ce traitement comporte peu de manipulation de données, ce qui limite la multiplication des erreurs. Le

nombre de points utilisés est de 486. L'interpolation est effectuée par la méthode des réseaux de triangles irréguliers (Triangulated Irregular Network (TIN)). Une classification de chaque pixel est ensuite effectuée en fonction des systèmes de cotation des méthodes DRASTIC et GOD (tableau 3).

Les valeurs du paramètre «recharge» (travaux de Hamel, 2002) (fig. 5) sont classées, pour chaque pixel, en fonction du système de cotation de la méthode DRASTIC (tableau 4).

Dans le cas de la méthode DRASTIC, le paramètre «type d'aquifère» permet de caractériser l'aquifère, tandis que dans celui de la méthode GOD (fig. 6), il sert à déterminer si l'aquifère est libre ou semi-confiné. Pour ce faire, on classe les dépôts quaternaires (Bolduc et Ross, 2001a, b) en fonction de leur capacité à produire un confinement. Cette information servira à raffiner et à préciser la couche du paramètre «type d'aquifère» pour la méthode DRASTIC. Ainsi, on regroupe les unités quaternaires en fonction de la classification définie pour la méthode GOD et des données disponibles (tableau 5). En ce qui a trait au till, en raison des grandes variations qu'il peut y avoir au niveau de la nature de ce dépôt (granulométrie de la matrice, degré de compaction) et de son épaisseur (de 1 à 70 mètres), on utilise une valeur moyenne pour la

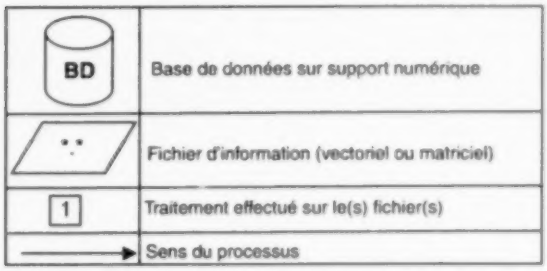

Figure 3. Légende des symboles utilisés dans la description des processus des figures 4 à 13.

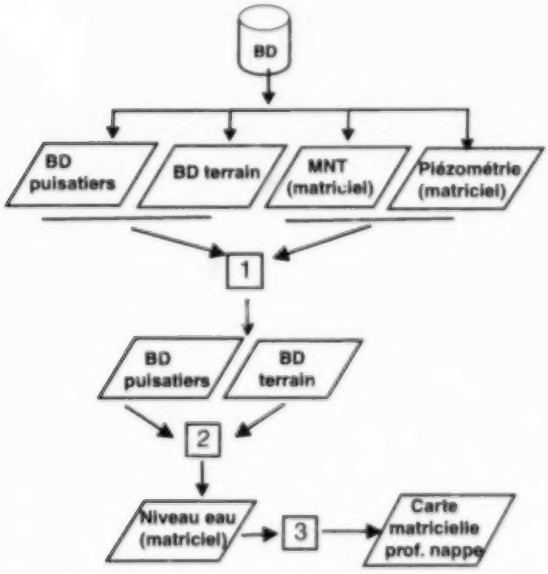

Figure 4. Organigramme de l'élaboration de la carte du paramètre «profondeur à la nappe». [1] Choix de la méthode d'obtention du paramètre. [2] Interpolation des données ponctuelles.[3] Classification des pixels en fonction de la méthode DRASTIC. MNT = modèle numérique de terrain

Tableau 3. Cotes attribuées au paramètre «profondeur à la nappe».

GOD	Cote	DRASTIC	Cote
< 2m	1	0-1.5 m	10
2–5 m	0,9	1.5-4.5 m	9
5–10 m	0,8	4.5-9 m	7
10–20 m	0,7	9-15 m	5
		15-23 m	3
20–50 m	0,6	23-31 m	2
50–100 m	0,5	> 31 m	1
> 100m	0,4		

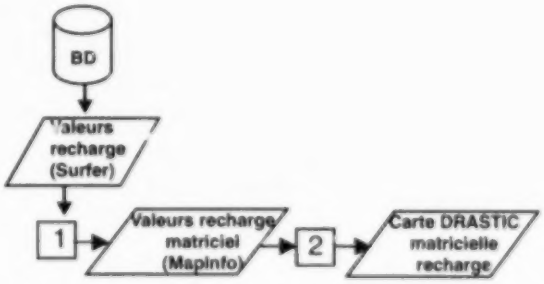

Figure 5. Organigramme de l'élaboration de la carte du paramètre «recharge» pour la méthode DRASTIC. [1] Interpolation des données sur la recharge.[2] Classification des pixels en fonction de la méthode DRASTIC.

Tableau 4. Cotes attribuées au paramètre «recharge».

RECHARGE (cm/a)	
Facteur multiplicatif (poids) = 4	
Intervalle de valeurs	Cote
0–5	1
5–10	3
10–18	6
18–25	8
> 250	9

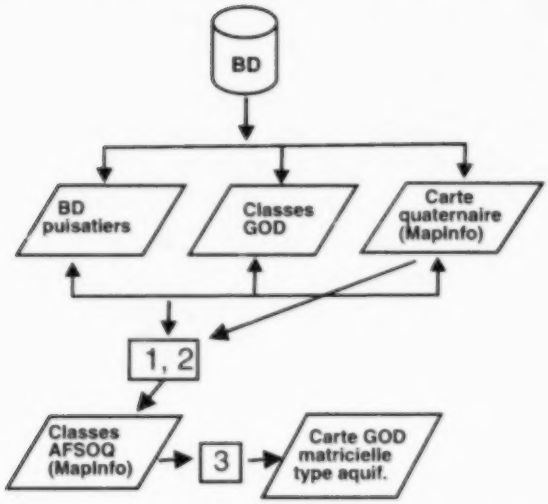

Figure 6. *Organigramme de l'élaboration de la carte du paramètre «type d'aquifère» pour la méthode GOD. [1,2] Regroupement des unités quaternaires et ajout d'un champ de cotation pour les dépôts quaternaires. [3] Transformation de la carte vectorielle en une carte matricielle. AFSOQ = système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec*

Tableau 5. Cotes attribuées au paramètre «type d'aquifère» selon la méthode GOD.

Type d'aquifère	Cote
aucun aquifère	0
artésien	0,1
confiné	0,2
semi-confiné	0,3
libre avec couverture	0,4–0,6
libre	0,7–1

conductivité hydraulique et donc une cote moyenne (tableau 6). Afin de déterminer le paramètre «type d'aquifère» pour la méthode DRASTIC (fig. 7), on regroupe ensuite les unités du socle rocheux selon le schéma de classification propre à cette méthode (tableau 7). À chacune des unités géologiques, on attribuera une cote qui se situe à l'intérieur de l'intervalle défini par la méthode et dont l'écart par rapport à la moyenne de cet intervalle dépendra de notre connaissance de l'état de confinement de l'aquifère (tableau 8). La carte du paramètre «type d'aquifère» est obtenue en combinant la carte géologique (Lavoie et al., 2001) ajustée à la région à l'étude avec la carte des dépôts superficiels regroupés et cotés suivant les types d'aquifère définis par la méthode GOD et en attribuant à chaque unité géologique une cote qui sera fonction de l'analyse effectuée préalablement.

Tableau 6. Cotes spécifiques à la région d'étude pour le paramètre «type d'aquifère» selon la méthode GOD. Nature des dépôts : Ax, At = dépôts alluviaux; Gx = dépôts fluvioglaciaires; Ma, Mb = dépôts marins (eau profonde, peu profonde); O = dépôts organiques; Tr, Tvr = till

Dépôt	Type d'aquifère	Cote
O	semi-confiné	0,3 (dépôts dessous?)
Ax,At,Gx..	semi-confiné	0,3 ou 0.5 (si Tr autour)
Mb	semi-confiné (Ma dessous)	0,3
	libre (si pas Ma autour)	0,7
Ma	semi-confiné	0,3
Tr	semi-confiné	0,5
	libre (si roc autour) (=Tr épaisseur faible)	0,7
Tr+Ma	semi-confiné	0,5
Tr+Mb	semi-confiné	0,5
Tvr	libre	0,9
Tvr+roc	libre	0,9
Roc	libre	1

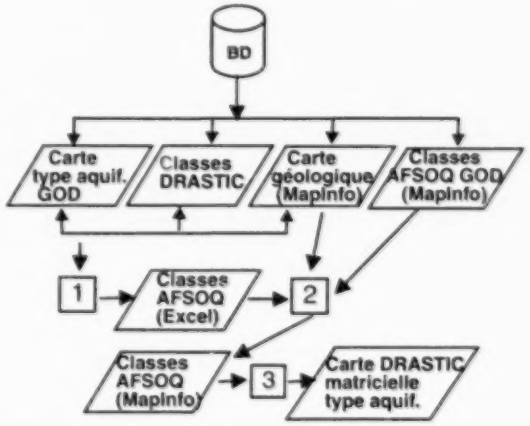

Figure 7. *Organigramme de l'élaboration de la carte du paramètre «type d'aquifère» pour la méthode DRASTIC. [1] Regroupement des unités selon le schéma de classification de la méthode DRASTIC. [2] Découpage de la carte géologique, combinaison avec la carte des types d'aquifère définis selon la méthode GOD et attribution d'une cote à chaque unité. [3] Transformation de la carte vectorielle en une carte matricielle. AFSOQ = système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec*

Le paramètre «type de sol» (fig. 8) est obtenu en répertoriant les différents types de sol en fonction des classes pédologiques définies par la méthode DRASTIC (tableau 9). Les spécifications de la légende des cartes pédologiques de Lajoie (1962, 1965) ont été utilisées à cette fin. En l'absence d'une correspondance parfaite entre une unité cartographique et une classe pédologique, une cote est attribuée par

Tableau 7. Regroupement des unités géologiques selon la méthode DRASTIC.

Unité géologique	Lithologie	Terminologie DRASTIC	Cote
Socle Grenvillien	roche métamorphiques	r. métamorphiques ou ignées, altérées ou fracturées	3–5
Intrusions alcalines	roches ignées	r. métamorphiques ou ignées, altérées ou fracturées	3–5
Formation de Covey Hill	grès, conglomérat (mineur)	grès ou calcaire massif	5–9
Formation de Cairnside	grès	grès ou calcaire massif	5–9
Formation de Theresa	grès/grès dolomitique	grès ou calcaire massif	5–9
Membre d'Ogdensberg	dolomie massive, grès dolomitique	grès ou calcaire massif	5–9
Membre de Huntington	dolomie, shale dolomitique	séquence de grès, calcaire et shale	4–6
Formation de Carillon	dolomie, calcaire (mineur)	grès ou calcaire massif	5–9
Groupe de Chazy	calcaire, shale, grès (mineur)	séquence de grès, calcaire et shale	4–6
Groupe de Black River	dolomie (à la base) calcaire	grès ou calcaire massif	5–9
Groupe de Trenton	calcaire, shale	séquence de grès, calcaire et shale	4–6

Tableau 8. Cotes attribuées au paramètre «type d'aquifère» selon la méthode DRASTIC.

Type d'aquifère	Unité géologique	Cote
libre	Grenville: socle grenvillien	4
semi-confiné	Grenville: socle grenvillien	3
libre	Intrusions alcalines	4
semi-confiné	Intrusions alcalines	3
libre	Formation de Covey Hill	7
semi-confiné	Formation de Covey Hill	6
libre	Formation de Cairnside	7
semi-confiné	Formation de Cairnside	6
libre	Formation de Theresa	8
semi-confiné	Formation de Theresa	7
libre	Membre d'Ogdensberg	8
semi-confiné	Membre d'Ogdensberg	7
libre	Membre de Huntington	6
semi-confiné	Membre de Huntington	5
libre	Formation de Carillon	8
semi-confiné	Formation de Carillon	7
libre	Groupe de Chazy	5
semi-confiné	Groupe de Chazy	4
libre	Groupe de Black River	7
semi-confiné	Groupe de Black River	6
libre	Groupe de Trenton	5
semi-confiné	Groupe de Trenton	4

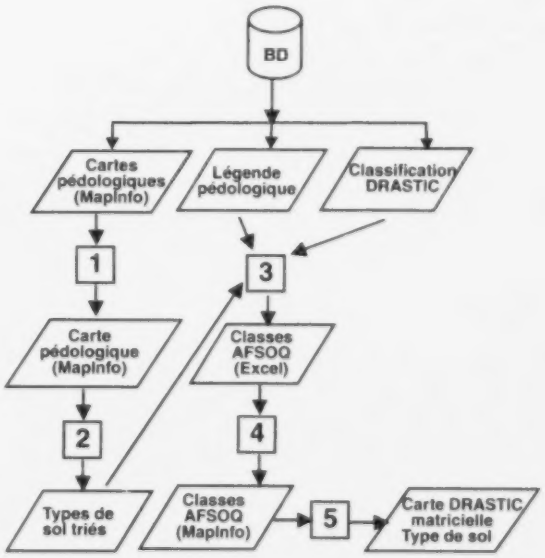

Figure 8. Organigramme de l'élaboration de la carte du paramètre «type de sol» pour la méthode DRASTIC. [1] Regroupement des cartes pédologiques en une seule. [2] Regroupement des types de sol. [3] Regroupement des types de sol en fonction de la terminologie propre à la méthode DRASTIC. [4] Ajout d'un champ de cotation dans le fichier de la carte des sols. [5] Transformation de la carte vectorielle en une carte matricielle. AFSOQ = système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec

déduction. Par exemple, pour établir la cote du sable limoneux, qui est abondant dans la région à l'étude, on se sert des classes du sable et du loam sableux. Puisque la cote de 9 (celle du sable) est trop forte et la cote de 6 (celle du loam sableux) est trop faible, on attribue au sable limoneux une cote de 8, qui est celle de la tourbe dans le schéma de classification. Si l'unité de loam sableux est composée de plusieurs matériaux, une cote de 9 à 6 sera attribuée en fonction de leurs proportions. On attribue à l'eau la cote maximale de 10. Pour une combinaison de plusieurs types de sol, c'est la cote du type le plus abondant qui prévaut, on la modifie si l'argile est présente à plus de 50 % et que le reste des matériaux est constitué de sable.

Pour le paramètre «topographie» (fig. 9), une carte matricielle du pourcentage de pente est réalisée à partir du modèle numérique de terrain et les valeurs de pente qui sont attribuées aux pixels le sont en fonction du système de cotation de la méthode DRASTIC (tableau 10).

Tableau 9. Cotes attribuées au paramètre «type de sol» selon la méthode DRASTIC.

TYPE DE SOL	
Facteur multiplicatif (poids) = 2	
Classes pédologique	Cote
Mince ou absent; gravier	10
Sable	9
Matériau organique (tourbe)	8
Argile fissurée ou agglomérée	7
Loam sableux	6
Loam	5
Loam limoneux	4
Loam argileux	3
Matériau organique (terre noire)	2
Argile intacte	1

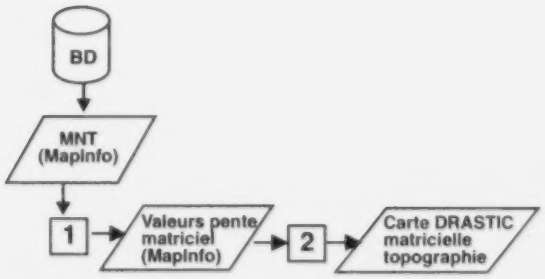

Figure 9. *Organigramme de l'élaboration de la carte du paramètre «topographie» pour la méthode DRASTIC. [1] Transformation de la taille des pixels, de 30 m sur 30 m à 500 m sur 500 m. [2] Obtention des valeurs de pente à partir du modèle numérique de terrain (MNT). [3] Classification des pixels en fonction de la méthode DRASTIC.*

Le processus d'évaluation du paramètre «impact de la zone vadose» est le même pour chaque méthode (fig. 10). Une classification des types de dépôts quaternaires présents sur le territoire est effectuée en fonction des spécifications de chaque méthode (tableaux 11 et 12) et de la connaissance des

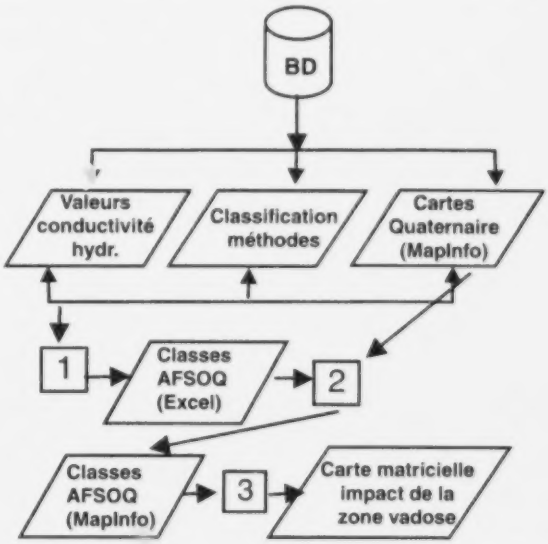

Figure 10. *Organigramme de l'élaboration de la carte du paramètre «impact de la zone vadose». [1] Classification des types de dépôts quaternaires en fonction des spécifications de chaque méthode et de la connaissance des valeurs moyennes de conductivité hydraulique pour chaque unité. [2] Regroupement des unités quaternaires. [3] Transformation de la carte vectorielle en une carte matricielle. AFSOQ = système aquifère fracturé du sud-ouest du Québec*

Tableau 10. Cotes attribuées au paramètre «topographie» selon la méthode DRASTIC.

TOPOGRAPHIE					
Facteur multiplicatif (poids) = 1					
Pente (%)	0–2	3–6	7–12	13–18	> 18
Cote	10	9	5	3	1

Tableau 11. Cotes attribuées au paramètre «impact de la zone vadose» selon la méthode GOD.

lithologie de l'aquitard ou de l'aquiperm	cote
sol résiduel	0,4
limon alluvial; loess; shale; calcaire fin	0,5
sable éolien; siltite; tuf; roches ignées ou métamorphiques fracturées	0,6
sable et gravier; grès; tuf	0,7
gravier (colluvion)	0,8
calcaire	0,9
calcaire fracturé ou karstique	1

valeurs moyennes de conductivité hydraulique pour chaque type d'unité. Les unités quaternaires sont regroupées en fonction de l'analyse des dépôts qui est faite en utilisant la terminologie propre à chaque méthode (tableaux 13 et 14).

Pour la carte du paramètre de la «conductivité hydraulique» (fig. 11), afin d'être cohérent avec le reste des données, la carte matricielle à cellule de 30 m sur 30 m a été généralisée en une carte à cellule de 500 m sur 500 m. On attribue une cote de conductivité hydraulique à chaque pixel en fonction du système de cotation de la méthode DRASTIC (tableau 15).

Les résultats obtenus sont des cartes matricielles dont les plages de valeurs correspondent à celles des cotes définies pour chaque paramètre. Le choix d'une dimension de 500 m sur 500 m pour la taille des cellules est basé sur le degré de précision de chaque type de données. C'est le paramètre «recharge» qui a imposé cette taille de cellule du fait que les valeurs de celui-ci sont connues tous les 500 m.

La carte de vulnérabilité finale réalisée à partir de ces cartes ne pourra présenter un degré de précision supérieur à 500 m sans qu'un biais ne soit introduit dans les résultats. Dans le cas de la méthode DRASTIC, l'élaboration de la carte finale (fig. 12) s'effectue par le calcul de l'indice de vulnérabilité ($I_{DRASTIC}$) qui intègre les sept paramètres, selon la formule présentée précédemment. Les valeurs possibles de l'indice sont réparties en huit classes de la manière indiquée au tableau 1. La carte finale est une représentation de ces huits classes. Dans le cas de notre étude, les valeurs de l'indice $I_{DRASTIC}$ s'échelonnent de 80 à 169; les classes 8, 1 et 2 ne sont donc pas représentées sur la carte. En ce qui a trait à la méthode GOD, on procède de façon semblable (fig. 13). L'indice de vulnérabilité (I_{GOD}) est calculé à l'aide de la formule présentée plus haut qui intègre trois paramètres. Les valeurs possibles de cet indice s'échelonnent de 0 à 1. Cet intervalle est subdivisé en cinq classes de la manière illustrée au tableau 2, où la vulnérabilité est qualifiée de très faible à extrême. Dans le cas de notre étude, les valeurs de l'indice I_{GOD} s'échelonnent de 0 à 0,7; la classe de vulnérabilité extrême n'est donc pas représentée.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Avant de présenter les résultats, nous discuterons de l'évaluation des paramètres et, de façon plus détaillée, de ceux de la recharge et de la conductivité hydraulique. La recharge est l'un des paramètres le plus difficile à évaluer. En effet, il existe peu de méthodes directes qui permettent d'obtenir la valeur de ce paramètre. De plus, il s'agit d'un phénomène discontinu spatialement (les zones de recharge étant locales) et une interpolation biaiserait le résultat aux

Tableau 12. Cotes attribuées au paramètre «impact de la zone vadose» selon la méthode DRASTIC.

IMPACT DE LA ZONE VADOSE		
Facteur multiplicatif (poids) = 5		
Classe de la zone non saturée	**Cote**	**moy.**
Aquifère confiné	1	1
Silt/argile	2–6	3
Shale	2–5	3
Calcaire	2–7	6
Grès ou séquence de grès, calcaire et shale	4–8	6
Sable/gravier à bonne proportion silt/argile	4–8	6
Roches métamorphiques ou ignées	2–8	4
Sable et gravier	6–9	8
Basalte	2–10	9
Calcaire karstique	8–10	10

Tableau 13. Cotes spécifiques à la région d'étude pour le paramètre «impact de la zone vadose» selon la méthode GOD. Nature des dépôts : Ax, Ap, At = dépôts alluviaux; E = dépôts éoliens; Go, Gs, Gx = dépôts fluvioglaciaires; Lb = dépôts glaciolacustres; Ma, Mb = dépôts marins (eau profonde, peu profonde); Md = dépôts deltaïques; Mg = dépôts remaniés par des glissements de terrain; O = dépôts organiques; Q = sédiments quaternaires non différenciés; R, R1, R+ = socle rocheux; T, Tr, Tv, Tvr = till

Dépôt	Conductivité hydraulique (m/s)	Matériaux géologiques associés selon la méthode GOD
Q		grès (F)
Tv	$3{,}00\times10^{-7}$	sols résiduels
T	$3{,}00\times10^{-7}$	sols résiduels
O		sols résiduels
Tvr	$3{,}00\times10^{-7}$	sols résiduels
Tr	$3{,}00\times10^{-7}$	sols résiduels
Gx	$7{,}80\times10^{-4}$	sables/graviers alluviaux/fluvioglaciaires
Gs	$7{,}80\times10^{-4}$	sables/graviers alluviaux/fluvioglaciaires
Go	$7{,}80\times10^{-4}$	sables/graviers alluviaux/fluvioglaciaires
Mb	$7{,}80\times10^{-4}$	sables/graviers alluviaux/fluvioglaciaires
Md	$7{,}80\times10^{-4}$	sables/graviers alluviaux/fluvioglaciaires
Lb	$7{,}80\times10^{-4}$	sables/graviers alluviaux/fluvioglaciaires
Ma	$1{,}00\times10^{-9}$	loess silteux alluviaux
Mg	$1{,}00\times10^{-9}$	graviers de colluvions
Ax	$7{,}80\times10^{-4}$	sables/graviers alluviaux/fluvioglaciaires
At	$7{,}80\times10^{-4}$	sables/graviers alluviaux/fluvioglaciaires
Ap	$7{,}80\times10^{-4}$	graviers de colluvions
E	$7{,}80\times10^{-4}$	sédiments éoliens
R1/R+		calcaires (FF)
R		formations ignées/métamorphiques + vieilles formations volcaniques

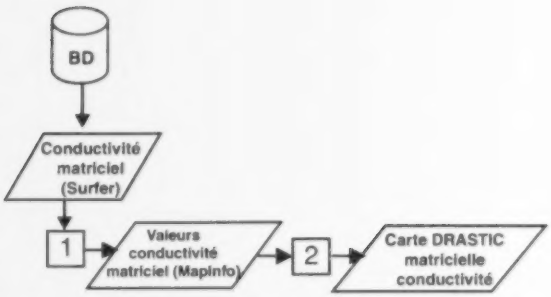

Figure 11. Organigramme de l'élaboration de la carte du paramètre «conductivité hydraulique» pour la méthode DRASTIC. [1] Passage d'un fichier Surfer (taille des pixels de 100m sur 100 m) à un fichier MapInfo (taille des pixels de 500 m sur 500 m). [2] Classification des pixels fonction de la méthode DRASTIC.

Tableau 15. Cotes attribuées au paramètre «conductivité hydraulique» selon la méthode DRASTIC.

CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE (m/d)	
Facteur multiplicatif (poids) = 3	
Intervalle de valeurs	Cote
< 4	1
4–12	2
12–29	4
29–41	6
41–81	8
> 81	10

Tableau 14. Cotes spécifiques à la région d'étude pour le paramètre «impact de la zone vadose» selon la méthode DRASTIC. Nature des dépôts : voir la légende au tableau 14

Dépôt	Conductivité hydraulique (m/s)	Matériaux géologiques associés selon la méthode DRASTIC	Cote
Q		grès/séquence de grès, calcaire, et shale	5
Tv	$3{,}00\times10^{-7}$	silt/argile	4
T	$3{,}00\times10^{-7}$	silt/argile	4
O		silt/argile	3
Tvr	$3{,}00\times10^{-7}$	silt/argile	4
Tr	$3{,}00\times10^{-7}$	silt/argile	4
Gx	$7{,}80\times10^{-4}$	sable et gravier	8
Gs	$7{,}80\times10^{-4}$	sable et gravier	8
Go	$7{,}80\times10^{-4}$	sable et gravier	7
Mb	$7{,}80\times10^{-4}$	sable et gravier	7
Md	$7{,}80\times10^{-4}$	sable et gravier	8
Lb	$7{,}80\times10^{-4}$	sable et gravier	8
Ma	$1{,}00\times10^{-9}$	silt/argile	3
Mg	$1{,}00\times10^{-9}$	silt/argile	3
Ax	$7{,}80\times10^{-4}$	sable et gravier	7
At	$7{,}80\times10^{-4}$	sable et gravier	7
Ap	$7{,}80\times10^{-4}$	sable et gravier	8
E	$7{,}80\times10^{-4}$	sable et gravier avec silt et argile	6
R1/R+		calcaire	7
R		roches métamorphiques ou ignées	6

limites des zones de recharge de valeurs différentes. La méthode utilisée ici (même si des paramètres interpolés ont été utilisés) consiste à recalculer une valeur de recharge tous les 500 m, ce qui limite le biais. Les zones de recharge préférentielles, pour le secteur à l'étude, sont situées à l'ouest et au sud–sud-est du territoire. Les valeurs de recharge obtenues constituent une approximation régionale, le résultat peut varier en fonction de la qualité des données et de la méthode utilisée.

L'estimation de la conductivité hydraulique présente des difficultés du fait de la forte variabilité spatiale de ce phénomène et de l'impossibilité d'obtenir une couverture adéquate de données pour la région. En effet, les aquifères évalués sont situés dans des milieux rocheux fracturés et leur conductivité hydraulique est donc d'autant plus variable. En outre, seulement 179 mesures ont été collectées. De plus, l'utilisation de différentes méthodes d'évaluation de ce paramètre (essai de perméabilité, essai de pompage, essai de

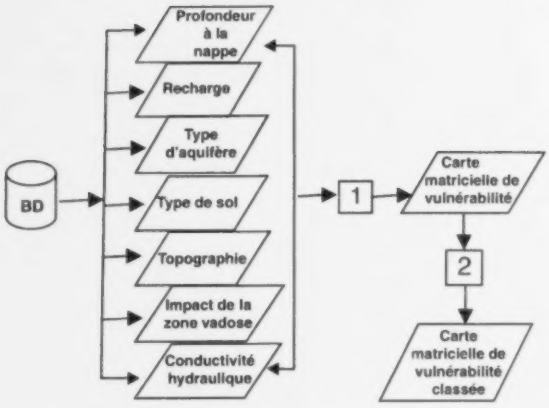

Figure 12. *Organigramme présentant l'intégration des sept paramètres retenus par la méthode DRASTIC. [1] Calcul des valeurs de vulnérabilité pixel par pixel selon la formule de l'indice DRASTIC. [2] Classification des pixels en fonction des classes DRASTIC.*

capacité spécifique, etc.) introduit un biais causé par la différence dans le rayon d'influence de chacune d'elles. Les résultats ne sont pas représentatifs de la même aire autour du puits. La carte résultante de ce paramètre révèle une très grande uniformité des cotes dans l'ensemble du territoire. Cela est dû a) à l'estimation continue d'un paramètre ponctuel, b) à la faible quantité d'information disponible dans l'ensemble du territoire (la variabilité spatiale de ce paramètre dans l'ensemble du territoire n'est pas saisie) et c) au schéma de classification de la méthode qui tend à homogénéiser les résultats.

On peut s'interroger à savoir comment l'évaluation de ce paramètre pourrait être améliorée. Une homogénéisation des méthodes d'obtention des valeurs de ce paramètre pour un territoire donné permettrait de limiter les erreurs. Les méthodes d'interpolation devraient être jumelées à des méthodes d'analyse de données afin de tenir compte du caractère variable dans l'espace de ce paramètre.

En ce qui a trait au paramètre «profondeur à la nappe», deux cartes ont été réalisées. L'une a été dressée avec les données ponctuelles et l'autre, avec les cartes matricielles du modèle numérique de terrain et de la piézométrie. Les résultats obtenus selon les deux approches présentent des différences. Notre choix s'est porté sur l'évaluation par les données ponctuelles car cela permettait de partir de données de base, non traitées, évitant ainsi la propagation d'erreurs reliées aux opérations telles que la soustraction. La carte paramétrique de la profondeur à la nappe présente des nappes dont la profondeur varie de 0 à 10 m dans l'ensemble avec quelques exceptions où elle est comprise entre 10 et 20 m, dans des secteurs qui se situent surtout dans l'est du territoire. Il faut aussi noter la différence entre les systèmes de cotation de ce paramètre pour les deux méthodes (tableau 3). En effet,

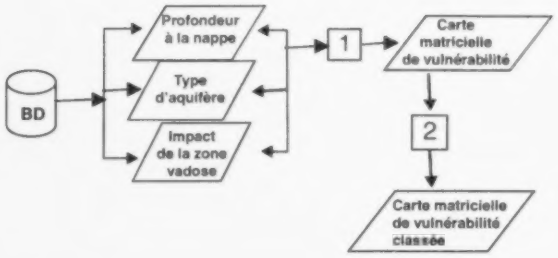

Figure 13. *Organigramme présentant l'intégration des trois paramètres retenus par la méthode GOD. [1] Calcul des valeurs finales de vulnérabilité pixel par pixel selon la formule de l'indice GOD. [2] Classification des pixels en fonction des classes GOD.*

les deux cartes présentent des variations dans la répartition des cotes qui engendrent une classification différente des surfaces et dont la validité est difficile à évaluer.

Le paramètre «impact de la zone vadose» ne représente pas le même phénomène pour les deux méthodes. Dans le cas de la méthode DRASTIC, il s'agit de qualifier le milieu surmontant la zone saturée de l'aquifère, alors que pour la méthode GOD, il s'agit de décrire ce milieu en fonction de son degré de consolidation. Cela veut donc dire que la perméabilité est une caractéristique qui entre en ligne de compte. De même, en ce qui a trait au type d'aquifère, la méthode GOD évalue ce paramètre en parlant de degré de confinement, ce qui est redondant par rapport à l'évaluation de l'impact de la zone vadose, alors que pour la méthode DRASTIC, la classification s'effectue en fonction de la nature des matériaux présents, ce qui est redondant par rapport à la détermination du paramètre de conductivité hydraulique.

En ce qui concerne les cartes de vulnérabilité réalisées selon les méthodes DRASTIC et GOD, leur comparaison est intéressante car elle permet de mettre en évidence les différences dans l'évaluation de la vulnérabilité. Compte tenu des résultats obtenus lors de travaux similaires pour les aquifères granulaires de la région de Portneuf (projet du piémont laurentien) (Murat et al., 2000a) et des données utilisées pour chacune des méthodes, on s'attendait à ce que les cartes soient similaires pour les deux méthodes, mais moins fines dans le cas de celle produite par la méthode GOD. Les résultats qui se dégagent de chacune de ces deux cartes peuvent être résumés à l'aide d'un certain nombre de constatations.

Dans la cas de la méthode DRASTIC, on obtient une carte dont près de 60 % de la surface est représentée par des zones à vulnérabilité modérée (fig. 14). Ces zones se situent aux endroits où il y a présence de sable ou de roc près de la surface. Les secteurs à faible vulnérabilité se trouvent au niveau des zones tampons, c'est-à-dire là où de l'argile est présente, mais sur une faible épaisseur. Les zones de recharge sont reconnaissables à une vulnérabilité plus forte. L'ensemble de la carte montre un découpage en classes de vulnérabilité assez fin pour une carte d'échelle régionale. Ainsi, même si les

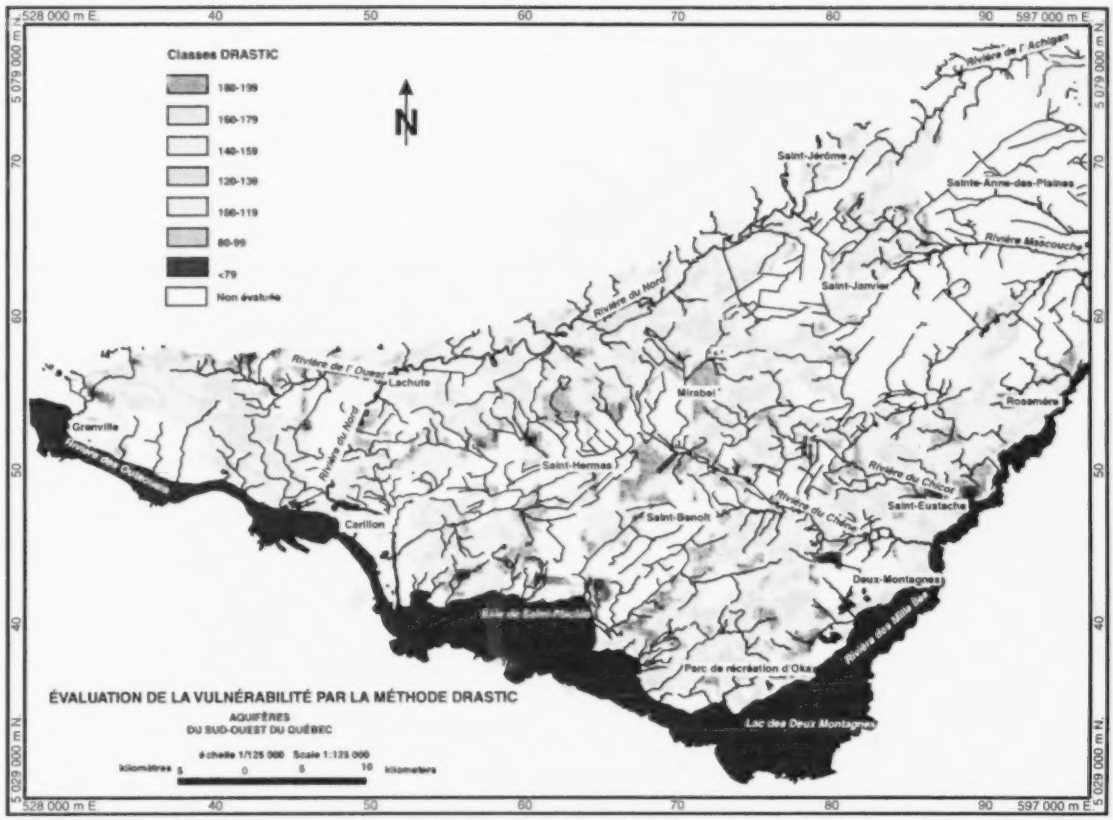

Figure 14. *Carte d'évaluation de la vulnérabilité selon la méthode DRASTIC.*

frontières ne peuvent être tracées avec précision, cela permet de mettre en évidence les différents secteurs de manière plus fine.

Dans le cas de la méthode GOD, on obtient une carte qui est en majeure partie à vulnérabilité modérée (fig. 15). C'est une carte régionale à valeurs relatives. Toutefois, la méthode ne permet pas de qualifier les zones de recharge comme étant à plus forte vulnérabilité que les secteurs environnants, d'évaluer dans quelle mesure elles le sont, ou de les mettre en évidence. La méthode permet cependant de classer les secteurs en fonction du degré de fracturation, une caractéristique régionale dont l'information reste très difficile à obtenir localement. Cela veut donc dire que, pour certains secteurs, l'attribution de cotes aurait pu être réalisée de manière plus précise.

Comme on l'a mentionné plus haut, étant donné la variabilité des paramètres utilisés par les deux méthodes, on s'attendrait à ce que les cartes de vulnérabilité mettent en évidence les zones de recharge. Ce qui est effectivement le cas pour la méthode DRASTIC mais pas dans celui de la méthode GOD.

Si on compare les deux méthodes, on remarque que la méthode DRASTIC permet d'obtenir une information plus fine au niveau de la représentation de la vulnérabilité (fig. 14). Cela est relié à un découpage des indices en huit classes, par rapport à cinq classes pour la méthode GOD. L'information s'en trouve plus diversifiée et le découpage de la carte élaborée par la méthode DRASTIC, plus varié que celui de la carte produite par la méthode GOD. Cela a peut-être un impact sur l'évaluation de la vulnérabilité, qui apparaît plus uniforme d'après la méthode GOD. Un autre point à noter est que la méthode GOD n'utilise que trois paramètres contre sept pour la méthode DRASTIC. Dans le cadre d'une étude portant sur un aquifère rocheux, il semble donc que la quantité d'information acquise pour l'évaluation de la vulnérabilité par la méthode GOD ne soit pas suffisante pour comprendre le fonctionnement du système aquifère puisque la carte produite est très uniforme.

Figure 14. *Carte d'évaluation de la vulnérabilité selon la méthode DRASTIC.*

frontières ne peuvent être tracées avec précision, cela permet de mettre en évidence les différents secteurs de manière plus fine.

Dans le cas de la méthode GOD, on obtient une carte qui est en majeure partie à vulnérabilité modérée (fig. 15). C'est une carte régionale à valeurs relatives. Toutefois, la méthode ne permet pas de qualifier les zones de recharge comme étant à plus forte vulnérabilité que les secteurs environnants, d'évaluer dans quelle mesure elles le sont, ou de les mettre en évidence. La méthode permet cependant de classer les secteurs en fonction du degré de fracturation, une caractéristique régionale dont l'information reste très difficile à obtenir localement. Cela veut donc dire que, pour certains secteurs, l'attribution de cotes aurait pu être réalisée de manière plus précise.

Comme on l'a mentionné plus haut, étant donné la variabilité des paramètres utilisés par les deux méthodes, on s'attendrait à ce que les cartes de vulnérabilité mettent en évidence les zones de recharge. Ce qui est effectivement le cas pour la méthode DRASTIC mais pas dans celui de la méthode GOD.

Si on compare les deux méthodes, on remarque que la méthode DRASTIC permet d'obtenir une information plus fine au niveau de la représentation de la vulnérabilité (fig. 14). Cela est relié à un découpage des indices en huit classes, par rapport à cinq classes pour la méthode GOD. L'information s'en trouve plus diversifiée et le découpage de la carte élaborée par la méthode DRASTIC, plus varié que celui de la carte produite par la méthode GOD. Cela a peut-être un impact sur l'évaluation de la vulnérabilité, qui apparaît plus uniforme d'après la méthode GOD. Un autre point à noter est que la méthode GOD n'utilise que trois paramètres contre sept pour la méthode DRASTIC. Dans le cadre d'une étude portant sur un aquifère rocheux, il semble donc que la quantité d'information acquise pour l'évaluation de la vulnérabilité par la méthode GOD ne soit pas suffisante pour comprendre le fonctionnement du système aquifère puisque la carte produite est très uniforme.

Figure 15. *Carte d'évaluation de la vulnérabilité selon la méthode GOD.*

En résumé, la méthode GOD ne semble pas adaptée à l'évaluation de la vulnérabilité dans le cas d'aquifères moins bien caractérisés et dans des territoires dont les caractéristiques sont complexes. La méthode DRASTIC, au contraire, permet une évaluation qui semble correspondre aux attentes puisque les zones à forte vulnérabilité se situent dans les zones de recharge et dans les zones à faible épaisseur de sédiments. L'intérêt de cette évaluation réside dans la connaissance de la variabilité relative de la vulnérabilité dans l'ensemble du territoire.

Les cartes obtenues sont des cartes d'aide à la décision. Comme dans toute autre produit résultant de la manipulation ou du traitement de jeu de données, ces cartes contiennent des erreurs qui se sont propagées de l'acquisition à la production de données, en passant par leur traitement. Lors de la réalisation de telles cartes, il est donc important que l'information sur les données, leur mode de traitement et la qualité des données obtenues soit rendue disponible.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le travail effectué ici en est un de cartographie régionale à l'échelle de 1/100 000. Le résultat de cette cartographie est un outil d'aide à la décision pour la gestion et l'aménagement du territoire à cette même échelle. L'échelle a été choisie en se basant sur celles des cartes utilisées pour l'évaluation de la vulnérabilité et sur le degré de précision des fichiers matriciels disponibles (taille des cellules de 500 m sur 500 m) qui impose un niveau de résolution à la carte. Ainsi, ces cartes ne se prêtent pas aux changements d'échelle ni à l'interprétation ou à la gestion ponctuelle. Les cartes de vulnérabilité sont réalisées dans un format matriciel, il n y a donc aucune précision au niveau de la position des frontières qui marquent des changements de la valeur des indices.

Dans un territoire donné, l'utilité de ces cartes réside dans la mise en évidence des zones à plus forte vulnérabilité par rapport aux zones à plus faible vulnérabilité. Toutefois, ces valeurs sont relatives et spécifiques au territoire évalué. Un

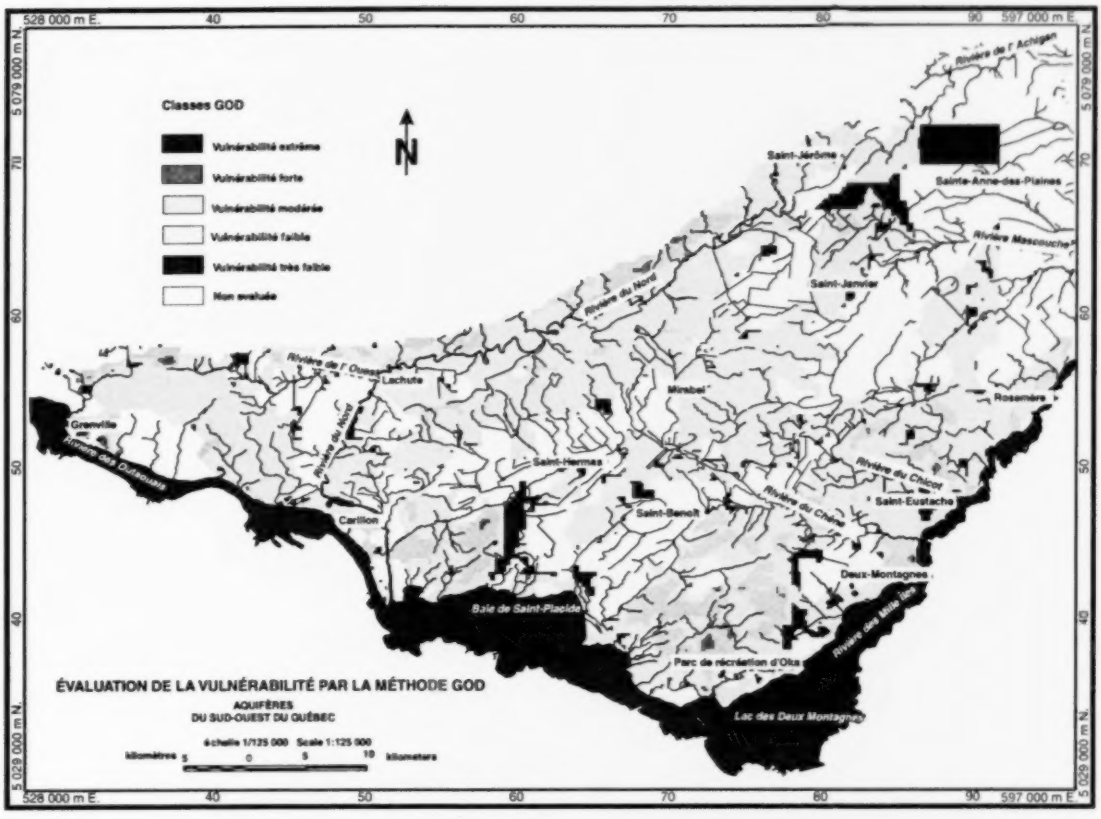

Figure 15. *Carte d'évaluation de la vulnérabilité selon la méthode GOD.*

En résumé, la méthode GOD ne semble pas adaptée à l'évaluation de la vulnérabilité dans le cas d'aquifères moins bien caractérisés et dans des territoires dont les caractéristiques sont complexes. La méthode DRASTIC, au contraire, permet une évaluation qui semble correspondre aux attentes puisque les zones à forte vulnérabilité se situent dans les zones de recharge et dans les zones à faible épaisseur de sédiments. L'intérêt de cette évaluation réside dans la connaissance de la variabilité relative de la vulnérabilité dans l'ensemble du territoire.

Les cartes obtenues sont des cartes d'aide à la décision. Comme dans toute autre produit résultant de la manipulation ou du traitement de jeu de données, ces cartes contiennent des erreurs qui se sont propagées de l'acquisition à la production de données, en passant par leur traitement. Lors de la réalisation de telles cartes, il est donc important que l'information sur les données, leur mode de traitement et la qualité des données obtenues soit rendue disponible.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le travail effectué ici en est un de cartographie régionale à l'échelle de 1/100 000. Le résultat de cette cartographie est un outil d'aide à la décision pour la gestion et l'aménagement du territoire à cette même échelle. L'échelle a été choisie en se basant sur celles des cartes utilisées pour l'évaluation de la vulnérabilité et sur le degré de précision des fichiers matriciels disponibles (taille des cellules de 500 m sur 500 m) qui impose un niveau de résolution à la carte. Ainsi, ces cartes ne se prêtent pas aux changements d'échelle ni à l'interprétation ou à la gestion ponctuelle. Les cartes de vulnérabilité sont réalisées dans un format matriciel, il n y a donc aucune précision au niveau de la position des frontières qui marquent des changements de la valeur des indices.

Dans un territoire donné, l'utilité de ces cartes réside dans la mise en évidence des zones à plus forte vulnérabilité par rapport aux zones à plus faible vulnérabilité. Toutefois, ces valeurs sont relatives et spécifiques au territoire évalué. Un

secteur ne présente pas une vulnérabilité absolue, mais sa vulnérabilité sera plus faible ou plus forte que celle du secteur voisin.

Il s'agit de cartes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque, ce qui signifie que l'on ne prend pas en compte le comportement d'éventuels polluants. Cela nécessiterait l'évaluation de la vulnérabilité au polluant par une méthode spécifique (p. ex. VULPEST pour les pesticides).

Si l'évaluation de la vulnérabilité donne globalement des résultats utilisables à des fins de gestion, localement il peut y avoir des biais engendrés par le manque d'information ou la mauvaise qualité des données. Il faut donc souligner que les cartes de vulnérabilité réalisées ici sont statiques, c'est-à-dire spécifiques à la période pour laquelle les données sont valides.

Les propriétés du milieu prises en compte par les méthodes sont choisies pour l'influence qu'elles ont sur les paramètres et pour la possibilité de mesurer ces paramètres. Dans la réalité, ces propriétés et leur interaction sont plus complexes. Il faut donc garder à l'esprit que les cartes obtenues sont le résultat d'une simplification.

Au vu des résultats obtenus pour chacune des deux méthodes, celle que nous retiendrons ici est la méthode DRASTIC. Celle-ci permet de mettre en évidence les zones de recharge comme étant les plus vulnérables du territoire étudié. La méthode montre que le territoire présente dans son ensemble une vulnérabilité modérée. Il n'est pas recommandé de baser des décisions sur les résultats de la carte GOD, lesquels ne sont pas cohérents par rapport aux caractéristiques du milieu, étant trop uniformes.

À la suite de cette étude, il est recommandé que soient réalisés des travaux plus approfondis sur les erreurs présentes sur la carte de vulnérabilité DRASTIC et sur la manière dont les erreurs se propagent lors de son élaboration. Ceci permettra que les prises de décisions basées sur de telles cartes soient faites en connaissance des incertitudes. De plus, il serait intéressant de valider les résultats obtenus par la méthode DRASTIC avec des modèles numériques qui pourraient être basés sur le temps d'infiltration. Cela permettrait de montrer à quel point la réalisation de telles cartes peut contribuer concrètement à l'aménagement du territoire.

REMERCIEMENTS

Le financement de ce projet est assuré par la Commission géologique du Canada, Développement économique Canada, le Conseil régional de développement des Laurentides, le ministère de l'Environnement du Québec, les MRC d'Argenteuil, de Mirabel, de Deux-Montagnes et de Thérèse-de-Blainville. Nous tenons à remercier J.-L. Riopel et M. Carrière pour leur appui constant tout au cours de ce projet, M. Ross et V. Cloutier pour les informations qu'ils nous ont fournies, ainsi que Y. Michaud pour la lecture critique de ce document.

RÉFÉRENCES

Aller, L., Bennett, T., Lehr, J.H., Petty, R. et Hacket, G.
1987: DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution in potential using hydrogeologic settings;United States Environmental Protection Agency, EPA/600/2-87/ 035, 622 p.

Bolduc, A.M. et Ross, M.
2001a: Géologie des formations superficielles, Lachute-Oka, Québec; Commission géologique du Canada, Dossier public 3520, 1 carte, échelle 1/50 000.

2001b: Géologie des formations superficielles, Laval, Québec; Commission géologique du Canada, Dossier public 3873, 1 carte, échelle 1/50 000.

Bourque, E., Cloutier, V., Lefebvre, R., Savard, M.M., Nastev, M. et Martel, R.
2001: Résultats initiaux de la caractérisation hydrogéochimique des aquifères fracturés du Sud-Ouest du Québec; Commission géologique du Canada, Recherches en cours 2001-D8, 14 p.

Desaulniers, D.E. et Cherry, J.A.
1989: Origin and movement of groundwater and major ions in a thick deposit of Champlain Sea clay near Montréal; Canadian Geotechnical Journal, vol. 26, p. 80–89.

Fagnan, N.
1998: Cartographie hydrogéologique régionale et vulnérabilité des aquifères de la MRC de Portneuf; Mémoire de maîtrise, Université du Québec, INRS-Géoressources, Québec, 215 p.

Fagnan, N., Nastev, M., Lefebvre, R., Martel, R. et Savard, M.
2001: Résultats initiaux d'une partie des travaux de caractérisation hydrogéologique des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec; Commission géologique du Canada, Recherches en cours 2001-D7, 11 p.

Foster, S. et Hirata, R.
1991: Groundwater pollution risk assessment. A methodology using available data; World Health Organization (WHO)/Pan American Healh Organization (PAHO)/Pan American Center for Sanitary Engineering and Environmental Sciences (CEPIS), Technical Report, Lima, Perou, 2nd edition, 73 p.

Hamel, A.
2002: Détermination de la recharge des aquifères de roc fracturé du Sud-Ouest du Québec; Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, 286 p.

Lajoie, P.G.
1962: Les sols des comtés d'Argenteuil, Deux-Montagnes et Terrebone (Québec); Ministère de l'Agriculture du Canada, 148 p., 3 cartes, échelle 1/20 000.

Lajoie, P.G.
1965: Étude pédologique des comtés de L'Assomption et de Montcalm (Québec); Ministère de l'Agriculture du Canada, 96 p., 1 carte, échelle 1/20 000.

Lavoie, D., Bolduc, A., Castonguay, S., Malo, M., Ross, M., Salad-Hersi, O., Séjourne, S., Tremblay, A., Lauzière, K. et McIntosh, A.
2001: The St. Lawrence Platform, Humber Zone, and Quaternary successions along Transect #1: Montréal-Appalachians / La Plate-forme du Saint-Laurent, la Zone de Humber et les successions quaternaires le long du transect #1 : Montréal-Appalaches; Commission géologique du Canada, Dossier public 2812, 154 p.

Murat, V.
2000: Étude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères à la pollution : application aux aquifères du Piémont Laurentien; Mémoire de maîtrise, Université du Québec, INRS-Géoressources, Québec, 127 p.

Murat, V., Martel, R., Michaud, Y., Fagnan, N., Beaudoin, F. et Therrien, R.
2000: Cartographie hydrogéologique régionale du Piémont Laurentien dans la MRC de Portneuf: comparaison des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité; Commission géologique du Canada, Dossier public 3664d, 9 cartes, échelle 1/200 000 et 1/250 000.

Murat, V., Martel, R., Michaud, Y. et Therrien, R.
2000: Étude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des aquifères à la pollution : application aux aquifères granulaires du Piémont Laurentien, Québec; *in* Recueil des résumés, 53e Conférence canadienne de géotechnique et 1re Conférence conjointe sur l'eau souterraine de l'Association internationale des hydrogéologues (AIH), section canadienne, et de la Société canadienne de géotechnique (SCG), du 15 au18 octobre 2000, Montréal (Québec), session GW9, p. 411-418.

Nastev, M., Savard, M.M., Lefebvre, R., Martel, R., Fagnan, N., Bourque, E., Hamel, A., Karanta, G. et Lemieux, J.M.
2001: Regional hydrogeological mapping project of the St Lawrence Lowlands of Southwestern Quebec : hydrogeological characterization work 1999-2000; Geological Survey of Canada, Current Research 2001-D9, 16 p.

Savard, M.M., Nastev, M., Lefebvre, R., Martel, R., Fagnan, N., Bourque, E., Cloutier, V., Lauzière, K., Gélinas, P., Kirkwood, D., Lapcevic, P., Karanta, G., Hamel, A., Bolduc, A., Ross M., Parent, M., Lemieux, J.M., Boisvert, E., Salad-Hersi, O., Lavoie, D., Gérard, F., Novakowski, K., Therrien, R., Etienne, M. et Fortier, R.
2000: Regional hydrogeology of fractured rock aquifers in Southwestern Quebec (St.Lawrence Lowlands); *in* Conference Proceedings, 53rd Canadian Geotechnical Conference and 1st Joint Groundwater Specialty Conference of the International Association of Hydrogeologists (IAH)-Canadian National Chapter (CNC) and the Canadian Geotechnical Society (CGS), October 15-18, 2000, Montréal, Québec, session GW6, p. 247-253.

Projet 980011 de la Commission géologique du Canada